

网络出版时间:2024-07-31 10:22 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.02.004
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240730.1237.001

种植方式对再生稻产量、生育期和 温光资源利用的影响

解振兴,朱业宝,施龙清,董萌,张居念,连玲,吴春珠,姜照伟

(福建省农业科学院 水稻研究所,福建 福州 350018)

【摘要】【目的】明确不同种植方式对再生稻产量、生育期和温光资源利用的影响,为再生稻种植模式的选择提供理论指导。【方法】以甬优2640为试验材料,设置人工移栽、机械移栽和直播3种植方式,研究了再生稻生育期和产量的变化规律,并分析了不同生育阶段温光资源利用状况。【结果】再生稻头季产量表现为直播>人工移栽>机械移栽,其中直播和人工移栽差异不显著,但均显著高于机械移栽;再生季产量直播和机械移栽均较人工移栽显著提高。在产量构成方面,头季和再生季有效穗数均表现为机械移栽和直播较人工移栽显著增加,而穗粒数和千粒质量均表现为机械移栽和直播较人工移栽降低。头季全生育期机械移栽和直播较人工移栽分别缩短了4和14 d,主要差异时期为播种一齐穗期,与播种期推迟有关;再生季全生育期人工移栽和机械移栽相同,直播较二者均缩短了5 d。头季机械移栽和直播的日均温度均高于人工移栽,而有效积温、光合有效辐射均低于人工移栽;再生季机械移栽的日均温度、有效积温和光合有效辐射与人工移栽相当,直播明显减少。从温光利用效率来看,头季有效积温生产效率、光合有效辐射生产效率和热量利用率均表现为直播最高,人工移栽次之,机械移栽最低;再生季表现为直播最高,机械移栽次之,人工移栽最低。【结论】再生稻3种植方式下,直播的有效穗数多、总产量最高、温光资源利用效率高,说明选用分蘖能力中等的再生稻品种结合直播可作为轻简高效栽培模式应用于生产中。

【关键词】 种植方式;再生稻;水稻产量;温光资源

【中图分类号】 S511.04

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)02-0032-08

Effect of crop establishment method on yield, growth duration and utilization of light and heat resources of ratooning rice

XIE Zhenxing, ZHU Yebao, SHI Longqing, DONG Meng, ZHANG Junian,
LIAN Ling, WU Chunzhu, JIANG Zhaowei

(Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350018, China)

Abstract: 【Objective】 The study aimed to clarify the impacts of different crop establishment methods on the yield, growth duration, and utilization of heat and light resources of ratooning rice, providing theoretical guidance for the selection of optimal planting patterns for ratooning rice cultivation. 【Method】 Using ‘Yongyou 2640’ as the experimental material, field experiments were conducted under three crop establishment methods: artificial transplanting (AT), machine transplanting (MT), and direct seedling (DS). The patterns of variation in growth duration and yield of ratooning rice were investigated, along with an evaluation of the utilization of heat and light resources across different growth stages, aiming to provide theoretical support for ratooning rice production practices. 【Result】 The results showed that the yield of

【收稿日期】 2023-11-15

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2017YFD0100105);福建省科技计划项目:省属公益类科研院所基本科研专项(2021R10-23002)

【作者简介】 解振兴(1981-),男,河南项城人,助理研究员,硕士,主要从事水稻高产栽培与生理生态研究。

E-mail: xzhenxing@126.com

【通信作者】 姜照伟(1973-),男,湖南宁乡人,研究员,博士,主要从事水稻高产栽培与生理生态研究。E-mail: jiangzwl973@163.com

main-crop rice followed the ranking order of $DS > AT > MT$, with no significant difference between DS and AT, but both were significantly higher than MT. In contrast, the yield of ratoon-crop rice was significantly increased by DS and MT compared to AT. In terms of yield composition factors, the effective panicle number in main-crop and ratoon-crop rice was significantly increased by DS and MT compared to AT, while spike number and 1 000-grain weight were decreased. During the growth period of the main-crop season, MT and DS were shortened by 4 days and 14 days respectively compared to AT. This difference mainly occurred from the seeding to heading stage due to delayed sowing. Conversely, during the growth period of ratoon-crop rice, there was no significant difference between AT and MT, while DS was shortened by 5 days. The average daily air temperature during the main-crop season for both MT and DS was higher than that for AT. However, their effective accumulated temperature and total photosynthetic active radiation were lower than those for AT. For the ratoon-crop season, average daily air temperature, effective accumulated temperature, total photosynthetic active radiation remained similar between MT and AT while there was a significant reduction in these factors for DS. The sequences of effective accumulated temperature production efficiency, photosynthetic active radiation production efficiency, and heat utilization efficiency were $DS > AT > MT$ for the main-crop, and $DS > MT > AT$ for the ratoon-crop, respectively. 【Conclusion】 These findings indicated that crop establishment method of DS achieved higher annual yield due to more panicles and greater light and heat resources efficiency, suggesting that DS can be adopted in combination with varieties that had lower tillering ability for a convenient and efficient ratooning rice cultivation mode in production.

Key words: crop establishment method; ratooning rice; yield of rice; light and heat resource

传统的水稻种植一直以人工移栽为主,随着水稻种植由传统单个家庭小面积种植向农民专业户、水稻种植合作社规模化发展,稻田管理规模越来越大,对种植投入成本越来越敏感,经济效益成为水稻生产的第一考虑因素,尤其在农业适龄劳动力减少、人工投入成本增加的背景下,精耕细作越来越难以实现,机械化、轻简化栽培逐渐替代传统人工移栽^[1]。当前水稻生产中主要有人工移栽、机械移栽和直播 3 种植方式。人工移栽方式下秧苗素质高、秧龄弹性大、生育期长,但劳动力成本高、种植效益低下,应用面积逐渐缩小。机械移栽省工节本、生产效率高,但移栽后根苗伤害重、返青期长、秧龄弹性小,同时对育秧技术要求严格,随着机械育插秧技术的成熟,逐渐成为当前我国水稻生产的主要种植方式^[2]。直播生产环节少、省工省力,但面临着早稻安全播种和晚稻安全齐穗、草害严重和后期倒伏的问题,使直播稻在全国大面积种植受到限制。我国南方稻区温光资源相对比较充足,早稻播种遇低温冷害、晚稻不能安全齐穗风险较小,随着精量穴直播机械及其配套技术的进步,实现了水稻直播种子入土、齐苗后成行成穴,类似移栽水稻群体的效果^[3],农户自发采用直播方式种植水稻的比例较高。从全球范围来看,欧洲、北美、大洋洲水稻种植以机械直播为主,日本、韩国、中国台湾以机械移栽为主^[4]。

再生稻是利用头季收获后稻桩上的休眠芽重新萌发生长成熟的一种稻作制度,适合于种植一季稻热量有余而双季稻热量不足的地区。我国南方地区温光资源丰富,稻作类型多样,有早稻-再生稻-菜、早稻-再生稻-马铃薯等多种轮作或者套种耕作模式^[5],由于育秧期间与后茬作物成熟期相重叠,种植户人力和物力投入成倍增加,亟需轻简高效栽培技术模式。已有研究从根系发育^[6]、群体茎蘖动态^[7-8]、籽粒灌浆过程^[9]、稻谷品质^[10]和抗倒伏能力^[11]等方面揭示了人工移栽、机械移栽和直播 3 种植方式下水稻的生长发育进程和群体特征,但关于不同种植方式下再生稻温光资源的利用情况尚不清楚。为此,本试验以甬优 2640 为材料,研究人工移栽、机械移栽和直播 3 种植方式下再生稻生育期和产量的变化规律,分析不同生育阶段温光资源利用情况,以为再生稻轻简高效栽培及周年温光资源合理配置提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在福建省农业科学院水稻研究所吴凤综合试验基地进行。试验材料为甬优 2640,设置人工移栽、机械移栽和直播 3 种植方式,每个处理 333 m²,3 次重复,采用随机区组设计。人工移栽:2021

年 3 月 18 日播种,大田用种量 15 kg/hm^2 ,4 月 20 日移栽,移栽规格 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。机械移栽:2021 年 3 月 22 日播种,大田用种量 22.5 kg/hm^2 ,4 月 18 日移栽,移栽规格为 $13.3 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。人工移栽和机械移栽前统一施用尿素 150 kg/hm^2 、过磷酸钙 375 kg/hm^2 、氯化钾 150 kg/hm^2 作为基肥,移栽后 7 d 和移栽后 14 d 各施用尿素 75 kg/hm^2 作为分蘖肥,拔节始期施用尿素 75 kg/hm^2 、氯化钾 150 kg/hm^2 作为穗肥。直播:选用敏能直播机 MN2016-10,2021 年 4 月 4 日播种,播种时开条沟,沟深 3 cm,种子播种于沟内,播种量为 30 kg/hm^2 ,株行距 $15 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,肥料施用方法为尿素 120 kg/hm^2 、过磷酸钙 375 kg/hm^2 、氯化钾 150 kg/hm^2 作为基肥,四叶一心期施用尿素 120 kg/hm^2 作为分蘖肥,倒二叶露尖施用 375 kg/hm^2 三元复合肥 ($m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O}) = 15 : 15 : 15$) 作为穗肥。再生季 3 个处理统一留桩高度 35 cm,头季齐穗后 18 d 施尿素 180 kg/hm^2 、氯化钾 90 kg/hm^2 作为促芽肥,收割后 3 d 施用尿素 90 kg/hm^2 作为苗肥,收割后 14 d 施用尿素 90 kg/hm^2 作为穗肥,其他管理措施与常规高产田相一致。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生育期 记录不同种植方式下头季的播种期、移栽期、齐穗期和成熟期,再生季齐穗期和成熟期。

1.2.2 产量 头季和再生季成熟期每个处理斜线选择 3 个点,每个点 4 m^2 ,调查总株数和总穗数,然后取穗数接近平均数的 5 株考查穗粒数、结实率

和千粒质量,其余的脱粒,计算实收产量。

1.2.3 气象数据 气象数据来源于试验田内设置的原农业部自动气象站,包括日最高气温、日最低气温、日均温度、光合有效辐射、降雨量等。光热资源及利用效率计算参考文献[12-14]的方法。

$$\text{EAT} = \sum(T_{\text{mean}} - T_0);$$

$$\text{TPE} = Y/\text{EAT};$$

$$\text{RPE} = Y/\sum\text{Par};$$

$$\text{HUE} = Y \times H/\sum\text{Par}.$$

式中:EAT 为有效积温($^{\circ}\text{C}$); T_{mean} 为日均温度; T_0 为生物学下限温度,甬优 2640 为偏粳型水稻品种,下限温度取 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$;TPE 为有效积温生产效率($\text{kg}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^2)$); Y 为稻谷产量(kg/hm^2);RPE 为光合有效辐射生产效率(g/MJ); $\sum\text{Par}$ 为生育期内总光合有效辐射(MJ/m^2);HUE 为热量利用率(%); H 为单位面积上干物质燃烧热,取值 $1.799 \times 10^7 \text{ J/kg}$ 。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行试验数据处理,SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 种植方式对再生稻产量及产量构成因素的影响 不同种植方式下再生稻产量及其构成因素详见表 1。

表 1 不同种植方式下再生稻产量及其构成因素

Table 1 Yield and yield components of ratooning rice with different crop establishment methods

再生稻 Ratooning rice	种植方式 Crop establishment method	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Effective panicle	穗粒数 Spikelet number per panicle	千粒质量/g 1 000-grain weight	结实率/% Seed setting rate	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
头季 Main-crop	人工移栽 Artificial transplanting	205.3 c	239.9 a	25.2 a	91.3 a	10 569.0 a
	机械移栽 Machine transplanting	228.1 b	219.1 b	24.3 b	89.2 a	9 682.0 b
	直播 Direct seeding	275.0 a	202.6 c	24.0 b	85.2 b	11 053.4 a
再生季 Ratoon-crop	人工移栽 Artificial transplanting	223.9 c	106.0 a	24.8 a	88.3 b	4 131.0 c
	机械移栽 Machine transplanting	271.8 b	98.9 b	24.3 a	88.9 b	4 470.0 b
	直播 Direct seeding	325.4 a	82.5 c	23.2 b	95.4 a	4 779.0 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。

Note: Within a column, different lowercase letters indicate significant differences at the level of $P < 0.05$. The same below.

由表 1 可以看出,不同种植方式下再生稻产量及产量构成因素差异明显。从头季来看,再生稻产量直播较人工移栽增产 4.6%,但差异不显著,机械

移栽较人工移栽和直播分别显著减产了 8.4% 和 12.4%;有效穗数表现为直播最多,机械移栽次之,人工移栽最少,直播和机械移栽分别较人工移栽增

加了 33.9% 和 11.1%; 穗粒数和千粒质量则相反, 均表现为人工移栽 > 机械移栽 > 直播, 穗粒数直播和机械移栽较人工移栽分别显著降低了 15.5% 和 8.7%, 千粒质量分别显著降低了 4.8% 和 3.6%; 结实率直播较人工移栽和机械移栽显著降低。从再生季来看, 产量表现为直播 > 机械移栽 > 人工移栽, 不同处理间差异显著; 与人工移栽相比, 直播和机械移栽的有效穗数分别显著增加了 45.3% 和 21.4%, 而穗粒数分别显著降低了 22.2% 和 6.7%, 千粒质量分别降低 6.5% 和 2.0%; 结实率直播较人工移栽显著增加了 8.0%, 而机械移栽与人工移栽差异不明显。

头季与再生季产量构成因素的比值与水稻再生能力密切相关。由表 2 可以看出, 有效穗数比值机械移栽和直播均显著高于人工移栽; 穗粒数比值人工移栽和机械移栽显著高于直播; 千粒质量比值不同种植方式差异不大; 结实率比值直播显著高于人

工移栽和机械移栽; 产量比值表现为机械移栽 > 直播 > 人工移栽, 不同种植方式间差异显著。

2.2 种植方式对再生稻生育期的影响

由表 3 可知, 从头季不同生育阶段来看, 人工移栽秧龄 33 d, 较机械移栽延长 6 d; 移栽一齐穗期, 人工移栽 65 d, 较机械移栽减少 2 d; 播种一齐穗期, 机械移栽和直播较人工移栽分别减少 4 d 和 12 d; 全生育期, 头季人工移栽生育期最长, 达到 136 d, 其次为机械移栽, 较人工移栽缩短 4 d, 直播较人工移栽缩短 14 d, 表明机械移栽与人工移栽的差异主要是播种一齐穗期, 而直播在齐穗一成熟期有所缩短。从再生季来看, 头季成熟一再再生季齐穗期、再生季齐穗一成熟期, 机械移栽和人工移栽时间一致, 分别为 45 d 和 33 d, 生育期为 78 d, 而直播头季成熟一再再生季齐穗期缩短了 6 d, 再生季齐穗一成熟期延长了 1 d, 生育期为 73 d。

表 2 不同种植方式下再生季与头季稻产量及其构成因素的比值

Table 2 Ratio of yield and yield components between the main crop and the ratooning crop with different crop establishment methods

种植方式 Crop establishment method	有效穗数 Effective panicle	穗粒数 Spikelet number per panicle	千粒质量 1 000-grain weight	结实率 Seed setting rate	产量 Yield
人工移栽 Artificial transplanting	1.091 b	0.442 a	0.984 a	0.967 b	0.391 c
机械移栽 Machine transplanting	1.192 a	0.451 a	1.000 a	0.997 b	0.462 a
直播 Direct seeding	1.183 a	0.407 b	0.967 a	1.120 a	0.432 b

表 3 不同种植方式下再生稻全生育期

Table 3 Growth period of ratooning rice with different crop establishment methods

d

种植方式 Crop establishment method	头季 Main-crop					再生季 Ratoon-crop		
	播种一齐穗期 Seeding to transplanting stage	移栽一齐穗期 Transplanting to heading stage	播种一齐穗期 Seeding to heading stage	齐穗一成熟期 Heading to maturation stage	全生育期 Whole growth period	头季成熟一 再生季齐穗期 Main crop maturation to ratoon heading stage	再生季齐穗一 成熟期 Heading to maturation stage	全生育期 Whole growth period
人工移栽 Artificial transplanting	33	65	98	38	136	45	33	78
机械移栽 Machine transplanting	27	67	94	38	132	45	33	78
直播 Direct seeding			86	36	122	39	34	73

注: 头季直播 86 d 代表播种至齐穗期时间。

Note: 86 d in main-crop rice represent the time from seeding to heading stage.

2.3 不同种植方式下再生稻各生育阶段温光资源的差异

2.3.1 日均温度 由表 4 可知, 从头季来看, 播种一齐穗期, 机械移栽的日均温度较人工移栽提高了 0.3 °C, 直播较人工移栽提高了 1.5 °C; 齐穗一成熟期, 不同种植方式下日均温度均相同。从再生季来看, 机械移栽和人工移栽的日均温度在不同生育阶段一致, 直播头季成熟一再再生季齐穗期日均温度较人工移栽和机械移栽降低了 0.1 °C, 而齐穗一成

熟期则提高了 0.7 °C。

2.3.2 有效积温 由表 4 可以看出, 从头季来看, 播种一齐穗期, 机械移栽的有效积温较人工移栽减少了 1.9%, 而直播较人工移栽减少了 2.9%; 齐穗一成熟期机械移栽与人工移栽的有效积温相同, 而直播则较二者降低了 40.1 °C, 降幅为 5.3%; 全生育期有效积温表现为人工移栽 > 机械移栽 > 直播。从再生季来看, 头季成熟一再再生季齐穗期和齐穗一成熟期, 机械移栽与人工移栽的有效积温相同;

头季成熟—再生季齐穗期,直播的有效积温较人工移栽减少了 13.9%,而齐穗—成熟期直播的有效积温较人工移栽则增加了 7.4%。

2.3.3 光合有效辐射 由表 4 可知,从头季来看,播种—齐穗期,机械移栽和直播的光合有效辐射较人工移栽分别减少了 3.2%和 11.2%;齐穗—成熟期,机械移栽与人工移栽相同,而直播则减少了

7.5%。从再生季来看,头季成熟—再生季齐穗期和齐穗—成熟期,机械移栽与人工移栽的光合有效辐射均相同;头季成熟—再生季齐穗期,直播的光合有效辐射较人工移栽减少了 15.5%,而再生季齐穗—成熟期直播的光合有效辐射较人工移栽增加了 7.9%,全生育期则减少了 6.5%。

表 4 不同种植方式下再生稻各生育阶段的温光资源

Table 4 Temperature and light resources of ratooning rice with different crop establishment methods

再生稻 Ratooning rice	种植方式 Crop Establishment method	日均温度/℃		有效积温/℃			光合有效辐射/(MJ·m ⁻²)		
		Average daily air temperature		Effective accumulated temperature			Total photosynthetic active radiation		
		播种—齐穗期 Seeding to heading stage	齐穗—成熟期 Heading to maturation stage	播种—齐穗期 Seeding to heading stage	齐穗—成熟期 Heading to maturation stage	全生育期 Whole growth period	播种—齐穗期 Seeding to heading stage	齐穗—成熟期 Heading to maturation stage	全生育期 Whole growth period
头季 Main- crop	人工移栽 Artificial transplanting	22.8	29.7	1 263.9	749.6	2 013.5	1 385.9	678.5	2 064.4
	机械移栽 Machine transplanting	23.1	29.7	1 240.5	749.6	1 990.1	1 341.2	678.5	2 019.7
	直播 Direct seeding	24.3	29.7	1 226.9	709.5	1 936.4	1 230.9	627.8	1 858.7
再生季 Ratoon- crop	人工移栽 Artificial transplanting	28.5	24.5	833.4	480.0	1 313.4	621.4	387.7	1 009.1
	机械移栽 Machine transplanting	28.5	24.5	833.4	480.0	1 313.4	621.4	387.7	1 009.1
	直播 Direct seeding	28.4	25.2	717.9	515.6	1 233.5	524.9	418.3	943.2

2.4 不同种植方式对再生稻温光利用效率的影响

2.4.1 有效积温生产效率 有效积温生产效率反映了水稻生长季内每 1℃积温所生产的稻谷产量。由表 5 可以看出,在头季,再生稻的有效积温生产效率表现为直播>人工移栽>机械移栽,不同种植方式间差异显著;与人工移栽相比,直播的有效积温生产效率增加了 8.2%,而机械移栽则降低了 7.4%。在再生季,再生稻的有效积温生产效率表现为直播>机械移栽>人工移栽,不同种植方式间差异显著;与人工移栽相比,直播和机械移栽的有效积温生产效率分别增加了 16.5%和 7.1%。

2.4.2 光合有效辐射生产效率 光合有效辐射生产效率反映了水稻生长季内光合有效辐射所生产的稻谷产量。由表 5 可以看出,在头季,再生稻的光合有效辐射生产效率表现为直播>人工移栽>机械移栽,不同种植方式间差异显著;与人工移栽相比,直播的光合有效辐射生产效率增加了 8.2%,而机械移栽则降低了 7.8%。在再生季,再生稻的光合有效辐射生产效率表现为直播>机械移栽>人工移栽,不同种植方式间差异显著;与人工移栽相比,直播和机械移栽的光合有效辐射生产效率分别增加了 24.4%和 7.3%。

表 5 不同种植方式下再生稻各生育阶段温光利用效率

Table 5 Utilization efficiency of temperature and light of ratooning rice with different crop establishment methods

再生稻 Ratooning rice	种植方式 Crop Establishment method	有效积温生产效率/ (kg·℃ ⁻¹ ·hm ⁻²)	光合有效辐射生产效率/ (g·MJ ⁻¹)	热量利用率/% Heat utilization efficiency
		Effective accumulated temperature production efficiency	Photosynthetic active radiation production efficiency	
头季 Main-crop	人工移栽 Artificial transplanting	5.24 b	0.51 b	0.92 b
	机械移栽 Machine transplanting	4.85 c	0.47 c	0.85 c
	直播 Direct seeding	5.67 a	0.59 a	1.06 a
再生季 Ratoon-crop	人工移栽 Artificial transplanting	3.27 c	0.41 c	0.74 c
	机械移栽 Machine transplanting	3.54 b	0.44 b	0.80 b
	直播 Direct seeding	3.81 a	0.51 a	0.91 a

2.4.3 热量利用率 热量利用率反映了光能转化为籽粒生物质的效率。由表 5 可以看出,不同种植方式下再生稻的热量利用率差异显著。在头季,机械移栽再生稻的热量利用率最低,较人工移栽降

低了 7.6%,而直播最高,较人工移栽增加了 15.2%。在再生季,机械移栽和直播再生稻的热量利用率均高于人工移栽,较人工移栽分别增加了 8.1%和 23.0%。

3 讨 论

3.1 不同种植方式对再生稻产量的影响

目前国内外关于不同种植方式(人工移栽、机械移栽和直播)的水稻产量研究结论不一致:杨波等^[10]研究认为水稻产量表现为人工移栽>机械移栽>机械直播;MADHULIKA 等^[15]和田青兰等^[16]研究指出,机械移栽水稻的总枝梗数和总颖花数高,穗粒数较多,产量表现为机械移栽>人工移栽>机械直播;BHAGIRATH 等^[17]和 RAJ 等^[18]研究表明,在无草害影响条件下直播与移栽水稻产量基本相当或略高于移栽;SHARMA^[19]和程建平等^[20]研究表明水稻直播产量显著高于移栽。种植方式对再生稻两季产量的影响显著:JIANG 等^[21]比较了翻耕和免耕下移栽和直播再生稻产量,指出由于单位面积穗数和生物量增加,再生稻头季产量直播明显高于移栽,而再生季产量两者相当;杨坚等^[22]研究表明,再生稻头季和再生季产量均表现为人工移栽高于直播。本研究结果表明,再生稻两季产量直播均高于人工移栽和机械移栽,与已有研究结论不一致,这可能与再生稻品种类型、播种期差异有关。已有研究中试验材料多为单季中、晚稻,温光资源随着生育进程的推进逐渐减少,采用直播方式安全齐穗的风险较大,后期灌浆成熟不良,导致结实率和千粒重降低,产量较人工移栽和机械移栽下降^[23]。本试验再生稻品种为甬优 2640,其单株分蘖力弱,从生产实践来看,由于品种种子售价较高,播种量偏低,大田基本苗普遍较少,有效穗数不足是甬优 2640 高产的主要限制因素,而直播的有效穗数较人工移栽和机械移栽显著增加,充分弥补了甬优 2640 有效穗数的不足。同时,本试验采用半机械直播机,属于精量穴直播的一种,株行距可调节,群体通风透光性和移栽群体相似,头季结实率稳定在 85% 以上,这与程建平等^[24]利用机械精量穴直播的研究结果一致。再生季与头季产量性状的比值与水稻再生能力密切相关,且产量和有效穗数是鉴定水稻再生力强弱的主要指标^[25]。本研究结果表明,有效穗数、产量表现为机械移栽较高,人工移栽最低,穗粒数、千粒质量表现为机械移栽最高,直播最低,说明机械移栽有利于发挥再生稻生产潜力。

3.2 不同种植方式对再生稻生育期及温光资源利用的影响

种植方式对水稻生长发育进程影响较为明显,已有研究均认为人工移栽水稻的全生育期最长,机

械移栽次之,直播最短,且差异主要发生在营养生长期阶段^[6,20,26]。但相关研究大多以中稻为试验对象,播种期受气候因素限制较小,基本可以做到不同种植方式同期播种。而对于再生稻来说,考虑到再生季安全齐穗要求尽量提早播种。本试验播种期处于早季,由于秧龄和温光资源的限制,机械移栽和直播的播种期分别较人工移栽推迟了 4 d 和 17 d,导致头季全生育期缩短 4 d 和 14 d,机械移栽关键生育期和人工移栽基本相同,全生育期的差异主要是播种期推迟所致。直播再生季齐穗较早,头季成熟至再生季齐穗期历经时间缩短,全生育期较人工移栽减少 5 d,而机械移栽与人工移栽相同。两季总生育期相比,直播较人工移栽、机械移栽分别缩短了 19 d 和 15 d。

温光资源是作物生产系统中影响产量和品质形成的主要因素,采用合理的栽培技术措施协调作物生长与温光资源关系,可以提升作物产量潜力和资源利用效率^[27]。李杰等^[28]研究认为,机械移栽和直播对温光资源的利用效率较人工移栽显著降低。本研究结果表明,与人工移栽相比,再生稻头季直播和机械移栽生育期内日均温度提高,这与播种期推迟有关;而有效积温和光合有效辐射减少,且均以直播最低,这与直播生育期缩短有关。再生季机械移栽和人工移栽日均温、有效积温和光合有效辐射相同,直播稻在齐穗之前较人工移栽减少,齐穗至成熟期较人工移栽增加。对有效积温生产效率、光合有效辐射生产效率和热量利用率,头季均表现为直播>人工移栽>机械移栽,再生季表现为直播>机械移栽>人工移栽。人工移栽生育期较长,占有日均温和光合有效辐射较多,但温光资源增加主要在育秧阶段,移栽到成熟阶段温光资源较机械移栽和直播增加不明显,因此本试验条件下人工移栽较机械移栽和直播无明显产量优势。

3.3 不同种植方式在水稻生产中的应用

在地势平坦的水稻产区,水稻种植大户、专业合作社在国家农业政策的扶持下,购置了整地机、插秧机、收获机等大型机械,建立了专业化的水稻育秧设施,种植方式适宜选择机械移栽^[29];机插秧采用高速插秧机,配合大穗型品种和营养土育秧,适量减少播种量,培育健壮秧苗和后期高光效群体,既可以提高工作效率,又能获得较高的产量^[30]。在丘陵山区,对于单个农户来说,由于耕地面积小、田块平整度不高、耕地相对分散等因素不利于机械化生产,考虑到机械化种植成本,在依靠人力可以完成的情况

下,建议以传统人工移栽为主;对于种植大户来说,前期需要购买大型农业机具和育秧设施,从投入成本、管理难易程度及种植效益的角度出发^[31],选择直播作为主要的种植方式,可以达到甚至超过人工移栽和机械移栽的产量水平。直播栽培宜选用生育期适宜、早生快发、抗倒伏能力强的水稻品种,也可以适当考虑单株分蘖力中等或偏弱的品种,通过单位面积穗数贡献最大或穗粒兼顾型的产量结构实现高产^[32],但要注意避开受台风影响较大的区域。

在轮作和套种的周年耕作模式^[33],与人工移栽、机械移栽相比,直播省去了育秧移栽环节,可以在前茬作物收获后直接翻耕播种,不受育秧秧龄限制,能灵活安排农时,可有效缓解茬口衔接紧张的问题,因此直播在水旱轮作系统中有一定的应用前景。

[参考文献]

- [1] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考 [J]. 中国科学:生命科学, 2014, 44(8): 845-850.
PENG S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(8): 845-850.
- [2] 于林惠, 丁艳锋, 薛艳凤, 等. 水稻机插秧田间育秧秧苗素质影响因素研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 73-78.
YU L H, DING Y F, XUE Y F, et al. Factors affecting rice seedling quality of mechanical transplanting rice [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 73-78.
- [3] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52-56.
LUO X W, JIANG E C, WANG Z M, et al. Precision rice hill-drop drilling machine [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12): 52-56.
- [4] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [5] 吴生顺. 中稻-再生稻-花椰菜无公害栽培技术 [J]. 福建稻麦科技, 2017, 35(1): 20-23.
WU S S. Pollution-free cultivation techniques for rotation system of mid-season rice-ratooning rice-cauliflower [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2017, 35(1): 20-23.
- [6] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 高产栽培条件下种植方式对超级稻根系形态生理特征的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2208-2220.
LI J, ZHANG H C, CHANG Y, et al. Influence of planting methods on root system morphological and physiological characteristics of super rice under high-yielding cultivation condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2208-2220.
- [7] 周红英, 蒋继武, 何立斌, 等. 不同种植方式对丰两优香 1 号产量及生长发育的影响 [J]. 杂交水稻, 2015, 30(1): 34-38.
ZHOU H Y, JIANG J W, HE L B, et al. Effects of different planting methods on yield and growth characteristics of Fengliangyouxiang 1 [J]. *Hybrid Rice*, 2015, 30(1): 34-38.
- [8] 雷小龙, 刘利, 刘波, 等. 杂交籼稻机械化种植的分蘖特性 [J]. 作物学报, 2014, 40(6): 1044-1055.
LEI X L, LIU L, LIU B, et al. Tillering characteristics of indica hybrid rice under mechanized planting [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1044-1055.
- [9] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 等. 不同种植方式对超级稻籽粒灌浆特性的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1631-1641.
LI J, ZHANG H C, GONG J L, et al. Influence of planting methods on grain-filling properties of super rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1631-1641.
- [10] 杨波, 徐大勇, 张洪程. 直播、机插与手栽水稻生长发育、产量及稻米品质比较研究 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2012, 33(2): 39-44.
YANG B, XU D Y, ZHANG H C. Research on growth, yield, quality of rice under direct seeding, mechanical transplanting, and artificial transplanting [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2012, 33(2): 39-44.
- [11] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2234-2243.
LI J, ZHANG H C, GONG J L, et al. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11): 2234-2243.
- [12] 徐春梅, 袁立伦, 陈松, 等. 长江下游不同生态区双季优质晚稻生长特性和温光利用差异 [J]. 中国水稻科学, 2020, 34(5): 457-469.
XU C M, YUAN L L, CHEN S, et al. Difference in growth characteristics, utilization of temperature and illumination of double-cropping high quality late rice in different ecological regions of the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(5): 457-469.
- [13] 岳伟, 陈金华, 阮新民, 等. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(6): 929-940.
YUE W, CHEN J H, RUAN X M, et al. Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 929-940.
- [14] 湛洁, 吕腾飞, 王志强, 等. 青菜/油菜茬口下水稻栽植方式对温光资源利用和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 405-414.
SHEN J, LYU T F, WANG Z Q, et al. Effects of planting methods on the utilization of temperature and sunshine resources and yield of rice under cabbage/rape-paddy cropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 405-414.

- [15] MADHULIKA S, PANKAJ K, VIRENDER K, et al. Inter-comparison of crop establishment methods for improving yield and profitability in the rice-wheat system of Eastern India [J]. *Field Crops Research*, 2020, 250: 107776.
- [16] 田青兰, 刘波, 钟晓媛, 等. 不同播栽方式下杂交籼稻非结构性碳水化合物与枝梗和颖花形成及产量性状的关系 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(1): 35-53.
TIAN Q L, LIU B, ZHONG X Y, et al. Relationship of NSC with the formation of branches and spikelets and the yield traits of indica hybrid rice in different planting methods [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 35-53.
- [17] BHAGIRATH S C, TAHIR H A, SETH B A, et al. Effect of crop establishment methods and weed control treatments on weed management, and rice yield [J]. *Field Crops Research*, 2015, 172: 72-84.
- [18] RAJ K J, RAVI G S, RAJ K G, et al. Tillage, crop establishment, residue management and herbicide applications for effective weed control in direct seeded rice of eastern Indo-Gangetic Plains of South Asia [J]. *Crop Protection*, 2019 (123): 12-20.
- [19] SHARMA A R. Direct seeding and transplanting for rice production under flood-prone lowland conditions [J]. *Field Crops Research*, 1995, (44): 129-137.
- [20] 程建平, 罗锡文, 樊启洲, 等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29(1): 1-5.
CHENG J P, LUO X W, FAN Q Z, et al. Influence of different planting methods on growth and development characteristics and yield of rice [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(1): 1-5.
- [21] JIANG P, XU F, ZHANG L, et al. Impact of tillage and crop establishment methods on rice yields in a rice-ratoon rice cropping system in Southwest China [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 18421.
- [22] 杨坚, 陈恺林, 赵正洪, 等. 不同种植方式对再生稻产量和品质的影响 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(3): 234-237.
YANG J, CHEN K L, ZHAO Z H, et al. Effect of different planting methods on yield and quality of ratooning rice [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2017, 43(3): 234-237.
- [23] 孙统庆, 杨洪建, 李杰, 等. 江苏直播稻发展历程回顾、弊端分析及对策探讨 [J]. *中国稻米*, 2014, 20(6): 5-9.
SUN T Q, YANG H J, LI J, et al. Retrospect and disadvantages analysis of Jiangsu direct-sowing rice and its countermeasures [J]. *China Rice*, 2014, 20(6): 5-9.
- [24] 程建平, 吴建平, 罗锡文, 等. 不同种植方式对早稻生长发育特性及产量的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(3): 457-460.
CHENG J P, WU J P, LUO X W, et al. Influence of different planting methods on growth characteristics and yield of early rice [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(3): 457-460.
- [25] 蔡秋华, 林强, 朱永生, 等. 再生稻高产高效生产技术研究进展 [J]. *科技促进发展*, 2021, 17(10): 1843-1850.
- CAI Q H, LIN Q, ZHU Y S, et al. Researched advances in high-yielding and high-efficiency production techniques for ratooning rice [J]. *Strategic Research*, 2021, 17(10): 1843-1850.
- [26] 曾勇军, 潘晓华, 石庆华, 等. 不同种植方式对陆两优 996 产量和品质的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2012, 34(5): 859-865.
ZENG Y J, PAN X H, SHI Q H, et al. Effects of planting methods on grain yield and quality of early rice cultivar Luliangyou 996 [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2012, 34(5): 859-865.
- [27] 赵明, 周宝元, 马玮, 等. 粮食作物生产系统定量调控理论与技术模式 [J]. *作物学报*, 2019, 45(4): 485-498.
ZHAO M, ZHOU B Y, MA W, et al. Theoretical and technical models of quantitative regulation in food crop production system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(4): 485-498.
- [28] 李杰, 张洪程, 董洋阳, 等. 不同生态区栽培方式对水稻产量、生育期及温光利用的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2661-2672.
LI J, ZHANG H C, DONG Y Y, et al. Effects of cultivation methods on yield, growth stage and utilization of temperature and illumination of rice in different ecological regions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13): 2661-2672.
- [29] 何瑞银, 罗汉亚, 李玉同, 等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 167-171.
HE R Y, LUO H Y, LI Y T, et al. Comparison and analysis of different rice planting methods in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 167-171.
- [30] 张桥, 向开宏, 孙永健, 等. 不同育秧方式下播种量和插秧机具对水稻产量及群体质量的影响 [J]. *核农学报*, 2020, 34(11): 2595-2606.
ZHANG Q, XIANG K H, SUN Y J, et al. Effects of seeding amount and transplanting machines on rice yield and population quality under different seedling raising methods [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(11): 2595-2606.
- [31] ZHANG Y P, ZHU D F, XIONG H, et al. Development and transition of rice planting in China [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, 13(6): 1270-1276.
- [32] 张文忠, 苏悦, 殷延勃, 等. 北方水稻直播栽培的农艺问题与对策 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(6): 699-703.
ZHANG W Z, SU Y, YIN Y B, et al. Agronomic problems and countermeasures of north rice in direct seeding cultivation [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(6): 699-703.
- [33] 赵建文, 蔡秋亮, 林淑琴, 等. 菜、稻、薯三熟三高产高效栽培模式 [J]. *福建稻麦科技*, 2014, 32(3): 32-34.
ZHAO J W, CAI Q L, LIN S Q, et al. High yield cultivation pattern of rotation by vegetables, rice and sweet potato [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2014, 32(3): 32-34.